

Stirlingův motor

P. Bouř*, L. Jandík, M. Šebek

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

*bourpetr@fjfi.cvut.cz

Abstrakt

Cílem tohoto textu je seznámení čtenáře s principem fungování Stirlingova motoru. Bereme ho jako neúspěšného konkurenta parního stroje. Po vysvětlení principu funkce a konstrukce motoru následuje popis chodu školního modelku za různých vnějších podmínek a analýza jeho chování, výkonu i účinnosti. Čtenář si odnese základní znalosti i s inspirací k provádění zajímavých experimentů.

1 Úvod

Téma Stirlingův motor jsme si vybrali s cílem nabídnout účastníkům Fyzikálního semináře pohled na atraktivní, alternativní princip fungování pohonné jednotky. Na stroji lze totiž nejen demonstrovat najednou více termodynamických jevů, ale můžeme navíc ozřejmit některá zvláštní konstrukční vylepšení, jako například regeneraci tepelné energie. V neposlední řadě je velmi důležité porovnat účinnosti jednotlivých komponent motoru a přezkoumat, za jakých podmínek běží motor s účinností nejvyšší.

2 Historie

Pojmem Stirlingův motor označujeme speciální typ zařízení, které přeměňuje tepelnou energii na energii mechanickou. Historicky jde tedy o alternativní zařízení k parnímu stroji, ovšem méně úspěšné a známé.

Motor vynalezl roku 1816 Robert Stirling. První a nejrozšířenější uplatnění pro něj našel jako vodní čerpadlo, pumpu. Stirlingovy motory se celé 19. století užívaly na místech, kde bylo třeba spíše menšího výkonu, případně jako bezpečnější náhrada parních strojů. U těch totiž hrozilo nebezpečí výbuchu vysokotlakého kotle. Výhodou potom byla nenáročná údržba a nízká cena.

Svůj pomyslný boj s parními stroji však Stirlingovy motory prohráli, neboť parní stroje se jednoduše rozšířily velmi rychle. V rané fázi vývoje také nebylo možné najít materiály, které by vydržely velmi vysoké teploty. Ty totiž motory potřebovaly k co nejvyšší účinnosti a výkonu. Počátkem 20. století pak elektromotory spolu se spalovacími motory nahradily Stirlingův téměř ve všech jeho aplikacích.

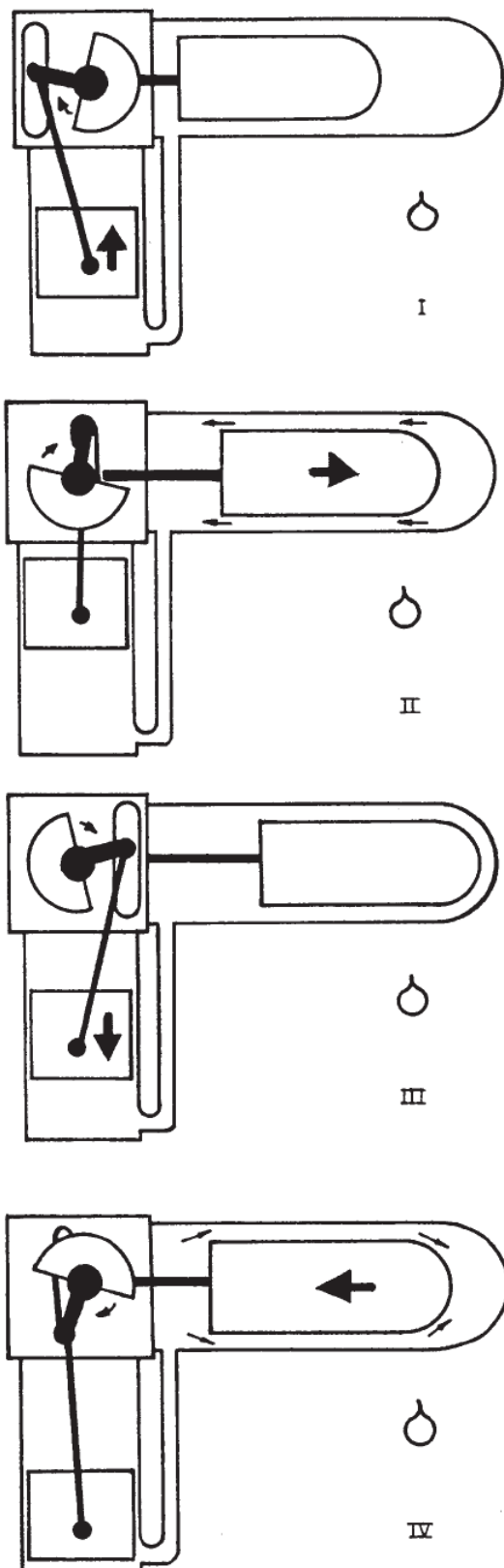
V polovině 20. století zvažovala firma Philips globální rozšíření prodeje svých rádií i do míst, kde chyběla stálá elektrifikace. Napájení lokálních radiostanic ovšem musel zajišťovat generátor, který potřeboval jen běžná, všude dostupná paliva jako například lampový olej. Ideálně by však generátor nemusel být závislý přímo na druhu paliva. Stirlingův motor se ukázal jako ideální i díky svému tichému chodu, který nerušil vysílání. Vývoj byl završen v roce 1951 produkcí elektrocentrály s výkonem 200 W. Díky rozvoji tranzistorové techniky však výrazně klesl příkon radiostanic. To znamenalo znovu konec i pro tyto inovované generátory.

Aktuálně se zvažuje aplikace v ponorkách, ohřev solární energií či jaderným štěpením pro vesmírný výzkum NASA [1].

3 Princip

Stirlingův motor funguje díky rozdílům teplot ve dvou komorách [2]. Jedna komora se přitom zahřívá, druhá se ochlazuje (Obr. 1).

Obr. 1 Teoretický cyklus Stirlingova motoru



Fáze I: Komora vpravo se ohřívá, teplo je dodáváno například lihovým hořákem, a probíhá tak izotermická expanze, při níž v napojené levé komoře plyn koná mechanickou práci zdvižením pístu. Mění se tedy parametry plynu (Obr. 2):

$$V_1 \rightarrow V_2 \quad p_1 \rightarrow p_2 \quad T_1 = \text{konst.}$$

Fáze II: Nastává izochorické ochlazení plynu, při němž se ovšem část tepelné energie předá plynu v dutém válci v pravé komoře. Ten nepřiléhá těsně na stěnu, a tak kolem něj může plyn proudit a předávat mu teplo, které se později znovu využije. Tomuto uložení tepelné energie se říká princip regenerace:

$$T_1 \rightarrow T_2 \quad p_2 \rightarrow p_3 \quad V_2 = \text{konst.}$$

Fáze III: Píst vlevo se díky dodané práci pohybuje dolů, izotermicky stlačuje plyn. Je tedy produkováno teplo:

$$V_2 \rightarrow V_1 \quad p_3 \rightarrow p_4 \quad T_2 = \text{konst.}$$

Fáze IV: Plyn proudící zpět do pravé komory kolem dutého válce absorbuje teplo, uložené během fáze II. Jedná se tedy o izochorické ohřátí:

$$T_2 \rightarrow T_1 \quad p_4 \rightarrow p_1 \quad V_1 = \text{konst.}$$

Reálný Stirlingův děj, který jsme na školním modelku naměřili (Obr. 3) však zcela neodpovídá teoretickému. Důvodů je několik:

Konstantní fázový posun válců zapříčiní, že v pV diagramu nebudou ostré úhly.

Dále kvůli velké rychlosti plynu cca při 1000 otáčkách za minutu neodpovídají fáze I a III izotermickému ději a princip regenerace určitě není stoprocentní.

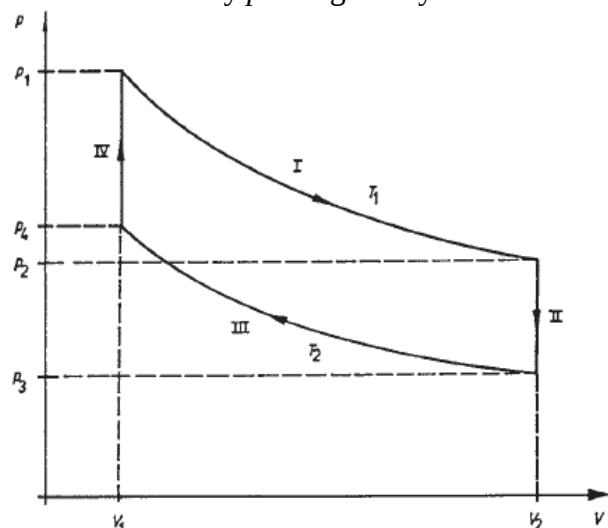
Část plynu se z hlediska konstrukce nedostane ke chladiči.

Velkým problémem je pak pracující válec, jenž netěsní, a dochází tak ke značným ztrátám tlaku.

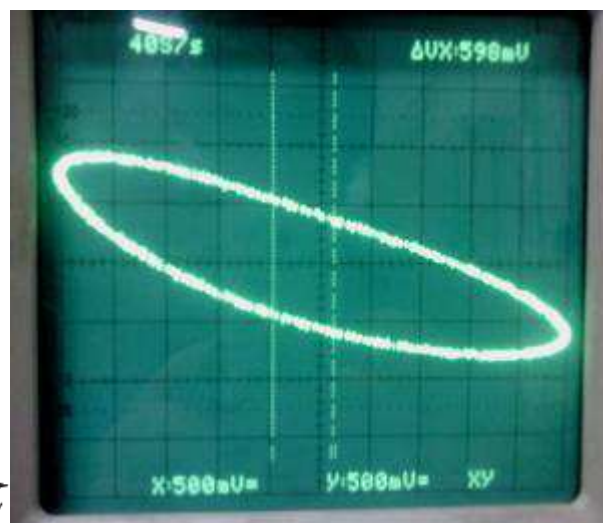
Na výsledku se negativně určitě podílí i tření mechanických částí a proudícího plynu.

Všechny uvedené nedostatky snižují výkon školního modelku.

Obr. 2 Teoretický pV diagram cyklu



Obr. 3 Reálný pV diagram cyklu na osciloskopu



4 Přípravy a měření

Před zahájením chodu Stirlingova motoru jsme museli kvůli měření provést kalibraci senzorů a určit tepelný výkon lihového hořáku v rámci modelku. Zbývalo ještě připojit i nastavit osciloskop a nakonec přepočíst signál napětí ze senzorů na fyzikální veličiny.

Výkon hořáku jsme určily odečtením spáleného objemu za čas. Znali jsme hustotu lihu i jeho výhřevnost. Po 3 měřeních jsme spočetli výkon hořáku na cca 170 W. Jeho účinnost byla však velmi malá. Podle manuálu [3] a našich dalších měření zhruba 7 %.

Na modelku lze měřit frekvenci otáček, teploty obou válců, tlak plynu a jeho objem v chladícím válci. Z těchto veličin lze jednak sledovat časové změny pV diagramu na osciloskopu (Obr. 3). Dále jsme schopni určit výkon Stirlingova motoru, účinnost a různé vlastnosti i reakce na změnu podmínek chodu.

5 Chod bez zátěže

Stirlingův motor bez zátěže se nám rozběhl až při teplotním rozdílu komor $\Delta T \approx 80 \text{ K}$. Otáčky rychle vzrostly na maximum 1082 ot./min při teplotě ohřívané komory $T_{oh.} = 129 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teplotě chladiče $T_{chl.} = 56 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Asi po 15 minutách se otáčky ustálily na hodnotě $\approx 900 \text{ ot./min}$. Ustálily se i teploty komor. Teplota chladiče zůstala na $T_{chl.} \approx 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

6 Generátor

Motor jsme zapojili jako generátor do obvodu se sériově zapojeným ampérmetrem, reostatem, paralelně připojeným voltmetrem. Tímto zatížením ihned vzrostl rozdíl tlaků. Zvětšila se tedy plocha pV diagramu. Otáčky se dále snižovaly se zvětšující se zátěží.

Na reostatu jsme měnili odpor, z napětí a proudu jsme počítali výkon. Zjistili jsme několik zajímavostí. Při snížení otáček vzrostla teplota chladiče. Motor se zastavil při $\approx 250 \text{ ot./min}$. Nejvyšší výkon $\approx 450 \text{ mW}$ jako generátor měl motor při $\approx 600 \text{ ot./min}$.

Prakticky to znamená, že motor dokázal slabě rozsvítit malou žárovku. Přitom ale citelně poklesly jeho otáčky.

7 Účinnost

Velmi problematické bylo určování účinnosti Stirlingova motoru. Dle manuálu [3] sestává účinnost motoru z několika faktorů. Jako nejvlivnější se jeví velmi malá účinnost hořáku, spočtená na $\eta_H = 7,5 \%$.

Dalším faktorem je tepelná účinnost Carnotova cyklu, závislá pouze na rozdílu teplot izotermických dějů (Obr. 2). Tato se pohybuje v maximu kolem $\eta_T = 25 \%$. Vnitřní účinnost Stirlingova cyklu, tedy z jaké části se náš cyklus blíží cyklu Carnotově, uvažujeme $\eta_I = 72 \%$. Účinnost převodu na mechanickou energii je $\eta_M = 47 \%$.

Celkově tedy dostáváme $\eta = \eta_H \eta_T \eta_I \eta_M \approx 0,6 \%$. Pokud porovnáme náš nejvyšší dosažený elektrický výkon $P_{\max} = 0,45 \text{ W}$ s výkonem hořáku $P_H = 170 \text{ W}$, dostaneme účinnost celého systému i s generátorem $\eta_E \approx 0,3 \%$. Z toho plyne, že účinnost samotného zařízení generátoru jest $\eta_G \approx 50 \%$.

7 Tepelné čerpadlo

Jako poslední typ chodu motoru jsme vyzkoušeli tzv. tepelné čerpadlo. Znamená to, že jsme motor rozběhli dodáváním práce přes připojený elektromotor. Jednotlivé děje nyní probíhaly v opačném pořadí. Hořák byl již samozřejmě zhasen.

Teplota komory s dutým válcem nyní rostla, a teplota chladiče viditelně rychle klesala. Dokonce jsme po chvíli dosáhli teploty o $\approx 3 \text{ K}$ nižší než byla pokojová.

8 Závěr

Výhodou Stirlingova motoru je nezávislost na druhu paliva, bezpečný provoz a vysoká vnitřní účinnost, s níž se blíží Carnotově cyklu. Celkovou účinnost školního modelu ovšem nejvíce sráží malá účinnost hořáku. Ten by bylo možné nahradit ekonomičtější formou ohřevu. Doufáme proto, že náš příspěvek bude ku pomoci dalším zájemcům o experimenty se Stirlingovým motorem.

9 Poděkování

Děkujeme bc. Tomáši Markovičovi za jeho čas, který s námi strávil při vysvětlování dané problematiky i při praktickém předvedení funkce a měření.

Reference

- [1] kol. autorů, *Stirling engine*, http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine
- [2] anonym, *Principe du moteur Stirling*, <http://leakystirling.free.fr/principe.php>
- [3] anonym, *P2360415 with Cobra3*,
http://www.phywe.com/index.php/fuseaction/download/lrn_file/versuchsanleitungen/P2360415/e/P2360415.pdf